内蒙古河套灌区紧邻排干沟土壤盐渍化与肥力特征分析

周利颖， 李瑞平， 苗庆丰， 窦 旭， 田 峰， 于丹丹， 孙晨云
（内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018）

摘 要： 合理改良河套灌区紧邻排干沟盐碱地，能够有效促进灌区盐碱地生态修复与农业可持续发展。结合描述性统计与主成分分析的方法，对河套灌区乌拉特灌域紧邻排干沟土壤盐碱化与肥力特征进行了分析。结果表明：(1) 研究区土壤属于重度氯化物型盐化土；Mg^{2+}为土壤盐化程度高的关键阳离子，Mg^{2+}含量过高减缓了Na^{+}的吸收速度，加剧了土壤碱化进程。(2) 0~40 cm土层土壤碱化度在13.0%~28.6%之间，土壤碱化度高的原因包括两个方面：一方面是由于$CaCO_3$不能阻止土壤吸附Na^{+}，另一方面是因为土壤中Mg^{2+}不能促进Na^{+}吸附；土壤pH与碱化度、总碱度均存在正相关关系。(3) 主成分分析结果表明，研究区可将土壤含盐量、Cl^{-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、pH、总碱度和碱化度作为土壤盐渍化的主要特征因子。(4) 研究区土壤钾素含量偏高，其他营养元素含量偏低。紧邻排干沟的土壤属于氯化物盐化土与碱化土复合型盐碱地，导致土壤具有土粒分散、湿时泥泞、不透气、不透水、干时硬结、耕性极差的特点；同时土壤养分偏低，应大量补充除钾素以外的其他土壤营养元素。该研究对于分析河套灌区紧邻排干沟盐碱土、制定合理土地利用政策与生态改良措施和实现区域可持续发展等方面具有重要作用。

关键词： 排干沟；盐碱化；盐离子；碱化度；主成分分析；肥力；内蒙古

土壤的盐化和碱化问题，常常是土壤开发利用的限制性因素，是干旱和半干旱地区耕地质量提升需要迫切解决的问题。在农业发展的历史进程中，这个问题的重要性已日益增加。在许多地方，由于土壤盐渍化和碱化面积的迅速扩展，已经引起农业生产的明显下降[1]。盐渍土的发生主要受区域性因素的影响，土壤的盐分组成、积盐和脱盐过程等都会由于气候、地质条件不同而存在较大的差异。河套灌区由于特殊的水文地质条件和长期不合理的灌溉制度，土地盐碱化与次生盐渍化问题相当严重，灌区盐渍化耕地面积约39.4×10^4 hm^2，占总耕地面积的68.65%[2]，灌区的土壤盐碱化造成作物出苗困难，大面积的耕地不得不弃耕成为了盐碱荒地，且荒地面积呈逐年递增的变化趋势。因此，土壤的盐碱化已经成为了制约河套灌区土地利用的主要影响因素，限制了当地农业经济的可持续发展。

目前，国内外学者对土壤盐碱化的发生演化、改良利用及其对环境的危害和综合治理等方面的研究颇多[3-5]，并且针对土壤特征分析的方法也多种多样。很多学者利用描述性统计分析的方法对盐碱土的盐渍化、碱化程度进行分类[6-9]，刘东兴等[10]利用因子分析和聚类分析的方法对大庆市盐碱土地进行了质量评价，景宇鹏等[11]采用主成分分析的方法对河套灌区的盐碱程度进行了研究，结果表明灌区土壤盐碱特征的主要因子为土壤含盐量、SO_4^{2-}、CO_3^{2-}、HCO_3^{-}和pH。宋楠等[12]对甘肃省种植3 a和6 a盐碱耕地离子的变化趋势进行了分析，研究表明土壤盐分的组成会随着时间的推移而发生改变。另外还有学者对土壤盐渍化主要参数的空间异质性进行了研究[13]。研究分析灌区重度盐碱弃耕地的盐碱特征，对当地农业的发展具有十分重要的意义。

盐碱土壤的类型不同，其对应的改良措施也不一样，因此对土壤的盐碱化特征分析显得尤为重

收稿日期： 2020-06-28； **修订日期：** 2020-08-30
基金项目： 内蒙古自治区科技重大专项(zdzx2018059)；国家自然科学基金项目(51839006,51769021)
作者简介： 周利颖(1995-)，女，硕士研究生，主要从事灌溉理论与新技术研究. E-mail: 1475531298@qq.com
通讯作者： 李瑞平. E-mail: nmglrp@163.com

要。内蒙古河套灌区的重度盐碱地主要分布于总干、总排干两侧和乌梁素海周边灌区地势低洼的地带，具有粉粒含量大的特点，导致土壤水分入渗速度慢，盐分常年累积。虽然目前对河套灌区土壤盐碱化问题的研究很多，但灌区重度盐碱土壤与排干沟之间的联系尚不明确。为揭示河套灌区紧邻排干沟土壤盐碱化特征，以乌拉特前旗紧邻排干沟的盐碱地为研究对象，结合描述性与主成分两种分析方法阐明土壤盐碱化及肥力特征，为合理改善紧邻排干沟的重度盐碱地、扩大土地资源利用和提高农业的可持续发展提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗西山咀农场四分场，地理位置108°37′28″~108°39′49″E，40°44′54″~40°45′49″N。研究区是紧邻十排干分支的盐碱弃耕地，面积为10.54 hm^2。该区地处中温带大陆性气候区，气候具有干燥多风、气温多变、日照充足、光能丰富、降水少、蒸发强和无霜期较短的特点。多年平均气温6~8 ℃，极端最低气温-36.7 ℃，极端最高气温36.4 ℃；降雨主要集中在6—8月，占全年降雨量的70%，多年平均降雨量196~215 mm；多年平均蒸发量2172.5 mm；最大冻土深度1.2 m [14]。研究区土壤的物理性质如表1所示。

1.2 样品采集

于2018年10月14日至15日进行2 d野外土壤样品采集，土壤采样点分别考虑了土壤质地和微地形等因素，在试验区选取比较有空间分布代表性的采样点。采样区的土壤空间变异性较强，土壤性状极不均匀。此次野外采集土壤剖面分别为0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm，每层取样500 g。在灌水渠与北侧排干沟之间平行采取两排样点（图1），每排各10个，两排采样点的间距为60 m，采样点与西侧排干沟之间的距离为30 m，采样点自西向东的间距依次为30 m、50 m、70 m、30 m、50 m、70 m、30 m、50 m、70 m和30 m（图1），共采集土壤样品60个。

1.3 测定项目与方法

将土壤样品带回室内自然风干后，过筛去除杂质（如植物残茬、石粒和砖块等），再将土壤平铺在木板上，先用木棒进行研磨、压碎，过1 mm孔径筛后进行可溶性盐离子含量、总盐含量、pH值、电导率和肥力等指标的测定。土壤中可溶性Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、Mg^{2+}、Ca^{2+}、K^+和Na^+的测定方法，依据土壤可溶性盐的分析方法[15-16]，分别称取每份土壤样品50 g与250 mL蒸馏水配制成水土质量比为5:1的混合液，震荡3 min后过滤，过滤后的清液用于测定土壤可溶性盐离子含量。

Ca^{2+}、Mg^{2+}和SO_4^{2-}采用EDTA滴定法测定；K^+、Na^+利用火焰光度计法测定；Cl^-采用$AgNO_3$滴定法测定；HCO_3^-和CO_3^{2-}利用双指示剂盐酸中和滴定法测定；土壤含盐量是以土壤中阳离子和阴离子的质量分数总量计算。土壤pH、电导率的测定是利用水土质量比为5:1的土壤悬浊液，pH采用pH电极（PB-10标准型酸度计）测定，电导率利用雷磁DDS-308A型电导率仪测定。

全氮量是采用凯氏蒸馏法利用凯氏定氮仪测得，碱解氮采用碱解扩散法测得，有效磷是利用紫外分光光度计采用碳酸氢钠法测定，速效钾含量的测定采用火焰光度法，土壤有机质含量采用重铬酸钾-外加热法测定。

1.4 数据处理

采用SPSS 20.0对土壤盐碱化和肥力指标分别进行数理统计和主成分分析，用Pearson相关系数表征土壤盐离子的相关性。分别采用Origin 2018和Excel 2019绘制图表。

表1 研究区土壤物理性质

Tab. 1 Soil physical characteristics of experimental site

土层/cm	颗粒组成			土壤质地	容重/($g\cdot cm^{-3}$)	田间持水率/($cm^3\cdot cm^{-3}$)	饱和导水率/($10^{-5}cm\cdot s^{-1}$)
	砂粒/% ($d\geq 0.02$ mm)	黏粒/% ($0.002\leq d<0.02$)	粉粒/% ($d<0.002$)				
0~10	26	14	60	粉壤土	1.51	24	3.798
10~20	21	18	61	粉壤土	1.51	24	3.866
20~40	32	22	46	壤土	1.49	25	4.012

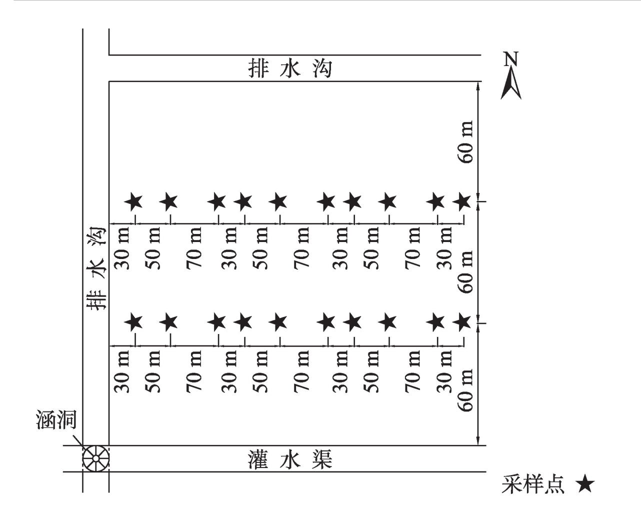


图1 研究区采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling points in the study area

2 结果与分析

2.1 土壤盐渍化特征

2.1.1 土壤盐离子特征 不同土壤盐离子含量随土层深度而变化(图2),土壤中阴离子主要为Cl^-和SO_4^{2-},Na^+和Ca^{2+}是土壤阳离子的主要成分。研究区0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层土壤含盐量分别为12.66 g·kg^{-1}、9.05 g·kg^{-1}和7.88 g·kg^{-1},土壤盐分随土层深度的增加而降低,土壤表层积盐严重,属于重度盐渍化土壤。从图2可以看出,土壤中阳离子含量由高到低的顺序为Na^+>Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^+,0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层土壤Na^+含量分别为2.08 g·kg^{-1}、1.86 g·kg^{-1}和1.83 g·kg^{-1},表层Ca^{2+}和Mg^{2+}含量分别达到了0.88 g·kg^{-1}、0.58 g·kg^{-1},K^+在阳离子中占比很小,几乎为零。土壤中阴离子含量由高到低的顺序为Cl^-> SO_4^{2-} > HCO_3^-,0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层土壤Cl^-含量分别为6.13 g·kg^{-1}、4.16 g·kg^{-1}和3.79 g·kg^{-1},SO_4^{2-}含量依次为2.29 g·kg^{-1}、1.52 g·kg^{-1}和1.41 g·kg^{-1},HCO_3^-在阴离子中所占比例很小。从土壤剖面离子分布情况来看(图2),土壤中Cl^-含量随土层深度的增加呈明显降低的趋势,SO_4^{2-}和Ca^{2+}略有降低,其他离子含量比较稳定,未随土层深度的增加出现明显的波动。邻近排干沟土壤盐渍化发生的主要原因包括两个方面:一是灌区农田土壤盐渍化程度严重,导致农田排水的矿化度较高,邻近排水沟的土壤受到侵蚀,土壤逐渐盐碱化;二是在非灌溉季节,排水沟水量减少或干涸,土壤水分蒸发后,盐分滞留在土壤表层,从而导致长时间的累积扩散,加剧了邻近排干沟土壤盐渍化程度。

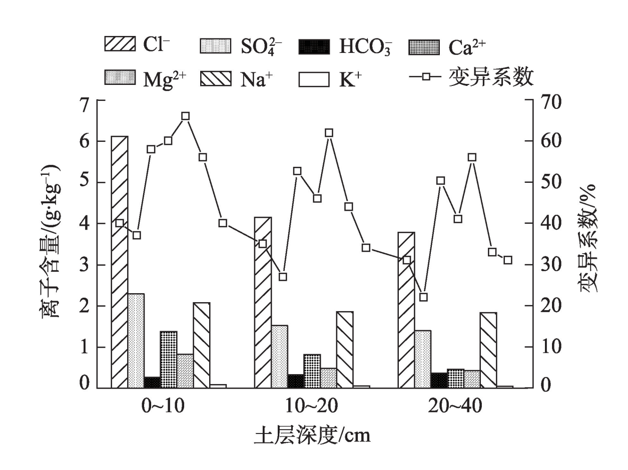


图2 土壤盐离子含量和变异系数随土层深度变化趋势

Fig. 2 Variation of soil salt ion content and coefficient of variation with depth

变异系数是反映变量离散程度的重要指标,在一定程度上揭示了变量的空间分布特性[17]。所有盐离子的变异程度均属于中等强度,变异系数在22%~66%。阳离子Mg^{2+}的变异程度最大,0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层的变异系数分别为66%、62%和56%,Ca^{2+}的变异程度仅次于Mg^{2+},0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层的变异系数分别为60%、46%和41%。阴离子HCO_3^-的变异程度较大,变异系数在50%~58%之间。各离子的变异系数基本随土层深度的增加呈降低的趋势,表层变异比较明显。研究区土壤盐分的变化主要受地势、气候和人为因素的影响,盐分含量的水平分布不均匀,有较强的空间异质性。

2.1.2 土壤盐离子间的相关性 相关性分析结果如表2所示,Na^+与阴离子Cl^-的相关性最大,相关系数为0.769,其次是SO_4^{2-},相关系数为0.737。土壤中Ca^{2+}、Mg^{2+}与Cl^-也呈极显著相关,相关系数分别为0.912、0.826,SO_4^{2-}与Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+的相关系数分别为0.832、0.748和0.737,而HCO_3^-与Ca^{2+}呈现极显著的负相关关系,相关系数为0.442。土壤含盐量与除HCO_3^-之外的其他6个离子均有极显著的正相关关系,其中与Cl^-的相关性最大,相关系数达到了0.985,与SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+和Na^+的相关系数分别为0.918、0.931、0.821、0.788和0.778,相关性具有明显差异,HCO_3^-与含盐量表现出极显著的负相关关系,相关系数为−0.379。

2.1.3 土壤含盐量与电导率的关系 对研究区所有土样的土壤含盐量与电导率进行拟合,其结果如图3所示。土壤含盐量(y)与电导率(x)建立的回归方差

表2 0~40 cm土层盐离子间的相关性

Tab. 2 Correlation between salt ions in 0–40 cm soil layer

离子指标	Cl^- /(g·kg^{-1})	SO_4^{2-} /(g·kg^{-1})	HCO_3^- /(g·kg^{-1})	Ca^{2+} /(g·kg^{-1})	Mg^{2+} /(g·kg^{-1})	Na^+ /(g·kg^{-1})	K^+ /(g·kg^{-1})	含盐量 /(g·kg^{-1})
Cl^-	1							
SO_4^{2-}	0.887**	1						
HCO_3^-	−0.386**	−0.270*	1					
Ca^{2+}	0.912**	0.832**	−0.442**	1				
Mg^{2+}	0.826**	0.748**	−0.294*	0.708**	1			
Na^+	0.769**	0.737**	−0.113	0.589**	0.555**	1		
K^+	0.784**	0.716**	−0.314*	0.722**	0.641**	0.591**	1	
含盐量	0.985**	0.918**	−0.379**	0.931**	0.821**	0.778**	0.788**	1

注：*表示在0.05水平上显著相关；**表示在0.01水平上显著相关。

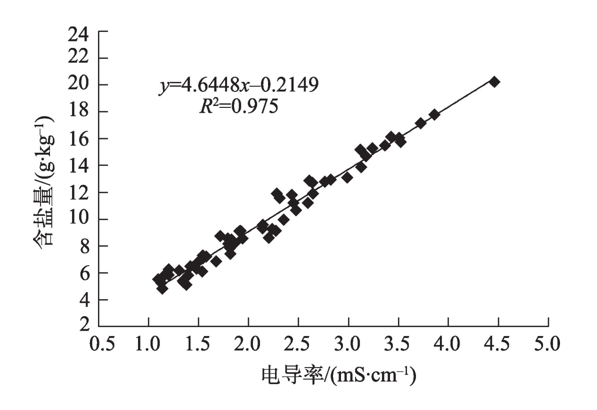


图3 土壤含盐量与电导率的关系

Fig. 3 Relationship between soil salt content and electrical conductivity

R^2达到0.975，电导率与含盐量之间存在着一次函数的关系，并呈极显著的正相关关系，说明在该区可以用土壤电导率来表示土壤含盐量。

2.2 土壤碱化度、pH与总碱度分析

2.2.1 土壤碱化指标特征 由土壤碱化指标的描述性统计分析结果可知(表3)，0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层土壤pH都较高，分别为8.09、8.32和8.30。0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层土壤碱化度分别为20.3%、21.3%、22.0%，表层土壤碱化度在13.0%~28.6%，碱化程度较高。0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层土壤总碱度分别为0.41 cmol·kg^{-1}、0.66 cmol·kg^{-1}和0.56 cmol·kg^{-1}，总碱度的最小值均大于非碱化指标(<0.3 cmol·kg^{-1})[18]，这也说明了土壤的碱化特征，土壤碱化程度的原因是碳酸钙不能阻止土壤吸附钠离子。由图2可知，土壤中HCO_3^-占阴离子的比率值均大于1%，当比率值达到0.1%左右时，就开始有抑制作物生长的作用，因此研究区的土壤碱化程度对作物生长有很大影响。

2.2.2 土壤pH与碱化度、总碱度的关系 由土壤pH与碱化度和总碱度的分析结果可知，pH与碱化度之间存在着一次函数的关系，R^2为0.542，土壤pH越高，碱化度越高(图4a)。总碱度与pH之间存在着极显著的指数关系，R^2为0.731，土壤总碱度越高，pH越高(图4b)。当总碱度比较低时，土壤pH依然较高，说明此时土壤已经发生碱化。这是因为Na_2CO_3和$NaHCO_3$的存在，导致土壤碱化后的不可逆性增强；HCO_3^-的大量存在导致土壤pH显著升高，使土壤中的部分Ca^{2+}、Mg^{2+}以碳酸盐的存在形式

表3 0~40 cm土层土壤碱化指标含量和变异系数

Tab. 3 Soil alkalization index content and coefficient of variation in 0–40 cm soil layer

土层/cm	指标	pH	阳离子交换量 /(cmol·kg^{-1})	交换性Na^+ /(cmol·kg^{-1})	碱化度/%	总碱度 /(cmol·kg^{-1})
0~10	含量	8.09±0.31	12.23±5.33	2.01±0.91	20.3±7.3	0.41±0.30
	变异系数/%	3	25	19	20	58
10~20	含量	8.32±0.46	12.15±6.65	2.11±1.11	21.3±7.3	0.66±0.54
	变异系数/%	3	27	23	12	52
20~40	含量	8.30±0.30	11.55±5.35	1.95±0.75	22.0±5.0	0.56±0.22
	变异系数/%	23	22	22	11	50

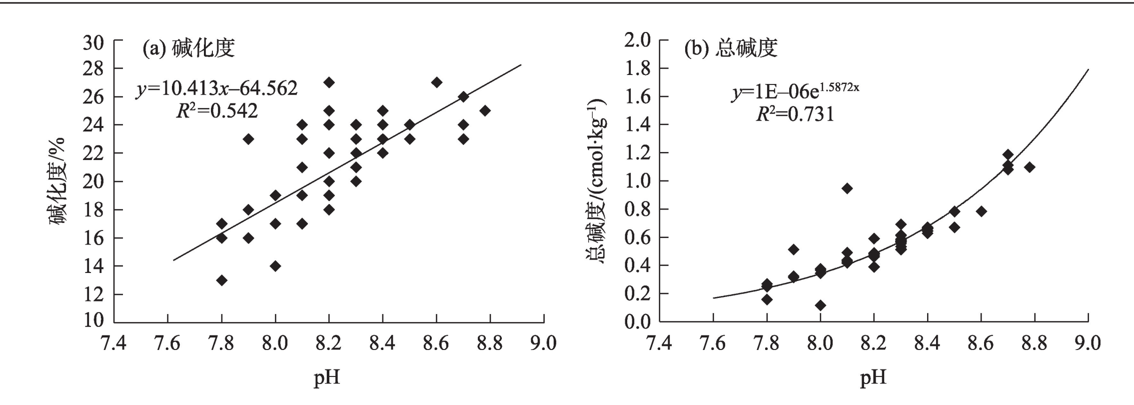


图4 土壤pH与碱化度和总碱度的关系

Fig. 4 Relationship between soil pH, alkalinity and total alkalinity

沉淀下来[19]，从而Na^+的交换能力提高，促进了OH^-的大量产生，导致土壤pH很高[20]。

2.3 土壤盐碱化的主导因子

通过对研究区不同盐离子间的相关性分析可知，不同土壤盐离子间存在显著性相关关系，而且不同土壤碱化指标也具有线性相关的特点，说明不同变量之间的信息有重叠的部分，因此，考虑对土壤盐渍化以及碱化指标进行数据降维分析，通过构建具有代表性的因子来评价研究区的盐碱化程度。对研究区60个土壤样点的盐碱指标采用主成分分析的方法提取特征值，并选取累积贡献率大于85%、特征值大于1的公因子。结果表明，前2个因子的特征值均大于1，其特征值分别为5.639、1.841，第1、2主成分的方差贡献率依次为67.99%、17.74%，累积贡献率达到85.73%，因此前2个主成分可以较好的反映研究区的土壤盐碱化状况。

当因子载荷矩阵中的因子负荷越大，其对应变量在相应主成分中的权重也越大[21]。由表4可知，与第一主导因子(F_1)密切相关的变量有土壤含盐量、Cl^-、Ca^{2+}和Mg^{2+}，且均与F_1呈正相关关系，其因子载荷分别达到为0.906、0.875、0.754、0.724，成分得分系数分别为0.161、0.155、0.134、0.128，这4个指标在很大程度上反映了研究区的土壤盐渍化状况，也进一步说明了研究区的土壤盐渍化类型主要为氯化物型。土壤的碱化指标与F_1均存在负相关关系，pH、总碱度的相关性较强，其因子载荷分别为−0.788、−0.747，所以第一主成分替代了11个原始因子中的含盐量、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、pH和碱化度6个因子的作用。在第二主导因子(F_2)中，土壤碱化度的因子荷载相对较高，且与F_2呈正相关关系，其因子载荷、成分得分系数分别为0.678、0.368。因此，通

表4 盐碱指标的因子荷载矩阵与成分得分系数矩阵

Tab. 4 Factor load matrix and component score coefficient matrix of salt and alkali index

盐碱指标	因子载荷矩阵		成分得分系数矩阵	
	F_1	F_2	F_1	F_2
Cl^-	0.875	0.306	0.155	0.166
SO_4^{2-}	0.684	0.380	0.121	0.207
HCO_3^-	−0.714	0.253	−0.127	0.137
Ca^{2+}	0.754	0.050	0.134	0.027
Mg^{2+}	0.724	0.262	0.128	0.142
Na^+	0.516	0.530	0.091	0.288
K^+	0.488	−0.062	0.087	−0.034
含盐量	0.906	0.403	0.161	0.219
pH	−0.788	0.509	−0.140	0.276
碱化度	−0.547	0.678	−0.097	0.368
总碱度	−0.747	0.550	−0.133	0.299

过对土壤盐碱化指标主成分分析，可将土壤含盐量、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、pH、总碱度和碱化度作为研究区的主要特征因子。根据各变量在相应主成分上的因子载荷，得出2个主成分的特征向量，将主成分用11个指标向量的线性组合表示，可分别得到2个主成分的函数表达式：

$$F_1=0.368X_1+0.288X_2-0.312X_3+0.318X_4+0.305X_5+0.217X_6+0.206X_7+0.382X_8-0.332X_9-0.230X_{10}-0.315X_{11}$$

$$F_2=0.226X_1+0.280X_2-0.186X_3+0.037X_4+0.193X_5+0.391X_6-0.046X_7+0.297X_8+0.375X_9+0.500X_{10}+0.405X_{11}$$

2.4 土壤肥力特征

土壤肥力指标反映了土壤能够提供作物生长所需各种养分的能力，是表征土壤肥沃性的一个重要指标，其是土壤各种基本性质的综合体现。对研究区20个土壤采样点的土壤全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质含量的描述性统计分析结果如表5

表5 0~40 cm土层土壤养分指标含量和变异系数分析

Tab. 5 Analysis of soil nutrient index content and coefficient of variation in 0−40 cm soil layer

土层/cm	指标	全氮量/($g\cdot kg^{-1}$)	碱解氮/($mg\cdot kg^{-1}$)	有效磷/($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾/($mg\cdot kg^{-1}$)	有机质/($g\cdot kg^{-1}$)
0~10	含量	0.58±0.33	19.64±7.07	5.08±2.78	207±80	6.99±5.51
	变异系数/%	36	34	19	42	29
10~20	含量	0.55±0.29	17.96±6.93	4.64±3.16	208±77	6.47±4.33
	变异系数/%	35	30	19	38	26
20~40	含量	0.48±0.35	17±7.49	4.27±2.36	182.50±81	6.27±3.95
	变异系数/%	27	27	20	37	22

所示,研究区土壤富含钾元素,0~40 cm土层土壤速效钾的含量均在101.5~287 $mg\cdot kg^{-1}$,土壤全氮量在0.13~0.91 $g\cdot kg^{-1}$,0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层的土壤碱解氮含量平均值分别为19.64、17.96和17 $mg\cdot kg^{-1}$,0~40 cm土层土壤有效磷含量均小于10 $mg\cdot kg^{-1}$,有机质平均含量在2.32~12.5 $g\cdot kg^{-1}$。根据全国第二次土壤普查养分含量等级划分标准,对土壤养分指标进行等级划分(图5),0~40 cm土层土壤全氮量的肥力水平在5~6级之间,碱解氮的肥力水平均属于6级,土壤有效磷在0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层的养分等级分别为4级、5级和5级,0~40 cm土层土壤速效钾含量的肥力水平在1~2级之间,土壤有机质的肥力等级均属于5级,表明土壤综合肥力偏低,这是由于其邻近排干沟会在一定程度上造成土壤养分流失。土壤各肥力指标的变异系数在19%~42%之间,属于中等变异程度[22],其中速效钾的变异系数略大,说明邻近排干沟的土壤速效钾的空间异质性较强。各养分指标的变异程度随土层深度的增加呈降低的变化趋势,这主要是由于外界干扰因素所导致。

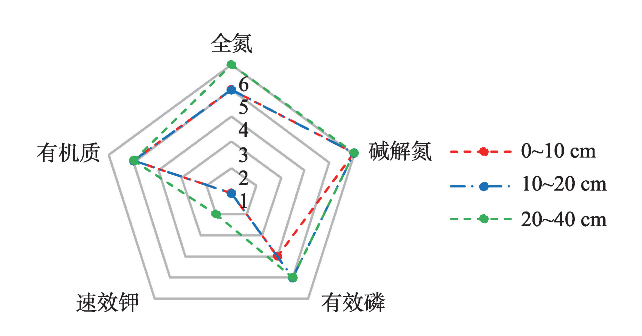


图5 0~40 cm土层土壤养分指标等级

Fig. 5 Soil nutrient index grade of 0−40 cm soil layer

3 讨论

灌区紧邻排干沟的土壤盐渍化程度极其严重,处于长时间弃耕的状态,盐分常年累积。在灌溉期内,邻近荒地的耕地中的土壤盐分被灌溉水带走,向无灌水的荒地积聚[23]。河套灌区紧邻排干沟的盐碱土壤具有可溶性盐含量高,pH值高,土壤物理性质差的特点,这与前人的研究结果基本一致[24]。一般情况下,盐碱土的类型可以通过盐碱土中$N_1(CO_3^{2-}+HCO_3^-)$与$N_2(Cl^-+SO_4^{2-})$的比值反映出来,其中,$N_1(CO_3^{2-}+HCO_3^-)$表示土壤中CO_3^{2-}和HCO_3^-的总含量,$N_2(Cl^-+SO_4^{2-})$表示土壤中Cl^-和SO_4^{2-}的总含量。当N_1/N_2值在1~4之间时,属于氯化物或硫酸盐苏打盐化土,小于1时属于氯化物或硫酸盐盐化土[25],研究区所有采样点土壤N_1/N_2值均小于1,属于氯化物或硫酸盐盐化土。土壤中Cl^-含量均大于SO_4^{2-}含量,主要属于氯化物盐渍土。Na^+是易溶于水的一价阳离子,对土壤进行多次灌水淋洗可以很大程度地降低Na^+含量。Mg^{2+}在土壤中容易形成溶解度很小的$Mg(OH)_2$和$MgCl_2$,$MgCl_2$是土壤成为"黑油碱"的主要成分,$MgCl_2$在较高的盐分浓度时溶解度较大,灌水淋洗后会由于土壤溶液稀释而降低$MgCl_2$的溶解度,导致Mg^{2+}的淋洗效率较低。与Mg^{2+}相比,土壤中Ca^{2+}的溶解度更大,更容易淋洗。Mg^{2+}和Ca^{2+}是等价阳离子,所以Mg^{2+}可被脱硫石膏中的Ca^{2+}置换出的含量较少,导致Mg^{2+}成为土壤盐渍化治理的关键问题,而且Mg^{2+}含量过高会减缓Na^+的吸收速度,加剧了土壤的碱化进程。另外,土壤盐离子的相关性分析结果表明,Cl^-与其他阳离子的相关性都较高,SO_4^{2-}次之,这与前人的研究结果基本一致,土壤盐离子在上下运移的过程中,氯化物最活跃,其次是硫酸盐、碳酸盐[26]。

由于紧邻排干沟的土壤具有渗透性差、盐渍化程度严重的特点,直接通过灌水淋洗的方式进行治理的效率较低,适宜在改善土壤物理性质的基础上,结合暗管排水排盐的技术措施对土壤进行盐分

淋洗，以达到变荒地为耕地的目的。研究区土壤中HCO_3^-含量较高，$NaHCO_3$属于水溶性盐，在土壤溶液中，交换性Na^+水解呈碱性反应，在这一反应过程中，H^+取代了Na^+后失去活性，产生了OH^-，使得土壤pH升高，这是碱化土壤的重要特征[20]。紧邻排干沟的土壤碱化程度严重，一方面是由于灌溉水中的Na^+进入土壤，当Na^+的含量过高时会被胶体吸附，从而引起土壤次生碱化，对作物生长带来负面影响[27]；另外排水沟中的Na^+也不断被土壤胶体吸附，加剧了土壤的碱化进程。研究区土壤碱化程度极其严重，导致土壤具有土粒分散、湿时泥泞、不透气、不透水、干时硬结和耕性极差的特点。目前灌区改善土壤物理性质的方法有很多，如表层掺沙、覆盖秸秆等都可以起到增大土壤水分入渗速率的作用，对于排干沟附近荒地适宜的改良措施，这有待进一步研究。本研究选择了土壤盐离子、含盐量、pH、碱化度和总碱度等11个指标作为土壤盐碱化参数，能够较为全面地代表紧邻排干沟土壤盐碱特征的总体情况。并且与常规统计学方法相比，主成分分析结果具有更直观、高效的特点，研究得出研究区的主要特征因子为土壤含盐量、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、pH、总碱度和碱化度，可通过主要特征因子来表征研究区的盐渍化程度。

土壤碱化程度高与物理性质差有很大关系，碱化度过高会造成土壤物理性质恶化，影响土壤的入渗性能[19]，这是研究区土壤渗透性差的重要原因。土壤各碱化指标呈较强的空间变异特征，变异程度为中等强度，这与寇薇[28]在河套灌区的研究结果相一致。土壤碱化程度大也会间接影响到土壤养分含量，pH值过高会导致大量的N通过NH_3和N_2O挥发从土壤中流失，是造成土壤中氮元素含量较低的原因之一。土壤中的有效磷在土壤中分布相对较浅[29]，而研究区土壤表层的有效磷含量依然很低，这也与pH值较高有着一定的联系，较高的pH值会降低土壤中磷的有效性[30]。灌区紧邻排干沟土壤盐渍化、碱化程度十分严重，应在治理土壤盐碱问题的基础上，补充除钾素外的其他养分元素。

4 结 论

采用数理统计与主成分分析的方法，对河套灌区紧邻排干沟盐碱地土壤盐碱化特征与肥力特征进行分析，主要结论如下：

（1）研究区0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层土壤含盐量分别为12.66 g·kg^{-1}、9.05 g·kg^{-1}和7.88 g·kg^{-1}，土壤盐分含量随土层深度的增加逐渐降低，属于重度盐渍化土壤，盐渍化类型属于氯化物盐渍土；土壤含盐量与Cl^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+和Na^+的相关系数分别为0.985、0.918、0.931、0.821、0.788和0.778，呈极显著正相关关系。

（2）0~10 cm、10~20 cm和20~40 cm土层土壤pH分别为8.09、8.32和8.30，土壤碱化度在13.0%~28.6%之间，土壤碱化程度严重导致了土壤具有土粒分散、湿时泥泞、不透气、不透水、干时硬结的特点；pH与碱化度之间存在着一次函数的关系（R^2=0.542），总碱度与pH之间存在着显著的指数关系（R^2=0.731）。

（3）盐碱化参数主成分分析结果表明，前两个主成分的累积方差贡献率达到85.73%，与第一主成分密切相关的是土壤含盐量、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、pH和总碱度，其中前4个参数与土壤盐渍化关系密切的因子与F_1呈正相关关系，pH和总碱度与F_1呈负相关关系；在第二主成分因子变量中，碱化度有相对较高的荷载，因此可将土壤含盐量、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、pH、总碱度和碱化度作为研究区的主要特征因子。

（4）研究区土壤富含钾元素，0~40 cm土层土壤速效钾含量均在101.5~287 mg·kg^{-1}，肥力等级属于1级、2级，其他肥力指标的等级均在4级以下，土壤肥力水平偏低；土壤肥力指标的变异系数在19%~42%，属于中等变异强度。

参考文献（References）：

[1] 张杰, 陈立新, 寇士伟, 等. 大庆地区不同利用方式土壤盐碱化特征分析及评价[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 171–175, 179. [Zhang Jie, Chen Lixin, Kou Shiwei, et al. Characteristics and evaluation of salinization of different land-use types of soils in Daqing City[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(1): 171–175, 179.]

[2] 雷廷武, Issac Shainberg, 袁普金, 等. 内蒙古河套灌区有效灌溉及盐碱控制的战略思考[J]. 农业工程学报, 2001, 17(1): 48–52. [Lei Tingwu, Issac Shainberg, Yuan Pujin, et al. Strategic considerations of efficient irrigation and salinity control on Hetao plain in Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(1): 48–52.]

[3] Ding J L, Wu M C. Study on soil salinization information in arid re-

gion using remote sensing technique[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(3): 404-411.

[4] Acosta J A, Faz A. Assessment of salinity status in intensively cultivated soils under semiarid climate, Murcia, SE Spain[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(11): 1056-1066.

[5] Martinez Sanchez M J, Perez-Sirvent C. Monitoring salinization processes in soils by using a chemical degradation indicator[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 109(1-3): 1-7.

[6] 王合云, 李红丽, 董智, 等. 滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征[J]. 土壤学报, 2015. 52(3): 706-712. [Wang Heyun, Li Hongli, Dong Zhi, et, al. Salinization characteristics of afforested coastal saline soil as affected by species of trees used in afforestation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 706-712.]

[7] 张晓光, 黄标, 梁正伟, 等. 松嫩平原西部土壤盐碱化特征研究[J]. 土壤, 2013, 45(2): 332-338. [Zhang Xiaoguang, Huang Biao, Liang Zhengwei. et al. Study on salinization characteristics of surface soil in western Songnen plain[J]. Soils, 2013, 45(2): 332-338.]

[8] 刘韬韬, 熊友才, 杨岩, 等. 玛纳斯河下游绿洲荒漠交错带土壤盐碱化特征分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2012, 30(2): 186-192. [Liu Taotao, Xiong Youcai, Yang Yan, et al. The characteristics of soil salinization in oasis-desert ecotone of the lower reaches of manas river[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2012, 30(2): 186-192.]

[9] 苑芷茜. 吉林省西部土壤盐碱特征和养分状况分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2010. [Yuan Zhiqian. Analysis of Saline-alkali Characteristics and Nutrient Status of Soil in Western Jinlin Province[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2010.]

[10] 刘东兴, 宫伟光. 大庆盐碱地立地质量评价[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(3): 98-103. [Liu Dongxing, Gong Weiguang. Evaluation of site quality for saline-alkali soil in Daqing[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(3): 98-103.]

[11] 景宇鹏, 段玉, 妥德宝, 等. 河套平原弃耕地土壤盐碱化特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1410-1420. [Jing Yupeng, Duan Yu, Tuo Debao, et al. Characteristics of salinization of deserted farmland in Hetao plain, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1410-1420.]

[12] 宋楠, 杨思存, 刘学录, 等. 不同种植年限盐碱荒地土壤盐分离子分布特征[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 660-665. [Song Nan, Yang Sicun, Liu Xuelu, et al. Distribution characteristics of soil salt ions in saline land relative to cultivation history[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 660-665.]

[13] 姜凌, 李佩成, 胡安焱, 等. 内蒙古阿拉善腰坝绿洲地下水水化学特征[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(11): 105-110. [Jiang Ling, Li Peicheng, Hu Anyan, et al. The groundwater chemical characteristics in the Yaoba oasis of Alxa area, Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(11): 105-110.]

[14] 窦旭, 史海滨, 苗庆丰, 等. 盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及地下水埋深对盐分的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 246-253. [Dou Xu, Shi Haibin, Miao Qingfeng, et al. Temporal and spatial variability analysis of soil water and salt and the influence of groundwater depth on salt in saline irrigation area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 246-253.]

[15] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983. [Agricultural Chemistry Committee of Soil Society of China. Conventional Analytical Methods of Soil Agrochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1983.]

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Study of Analysis of Soil and Agrochemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[17] 赵秀芳, 杨劲松, 姚荣江. 基于典范对应分析的苏北滩涂土壤春季盐渍化特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 422-428. [Zhao Xiufang, Yang Jinsong, Yao Rongjiang. Characteristics of soil salinization in mudflat of north Jiangsu province based on canonical correspondence analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 422-428.]

[18] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993. [Wang Zunqin, Zhu Shouquan, Yu Renpei. Saline Soil in China[M]. Beijing: Science Press, 1993.]

[19] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Huang Changyong. Pedology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[20] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. [Li Xueyuan. Soil Chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.]

[21] 王慧敏, 郝祥云, 朱仲元. 基于干旱指数与主成分分析的干旱评价——以锡林河流域为例[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 95-103. [Wang Huimin, Hao Xiangyun, Zhu Zhongyuan. Drought assessment based on drought index and principal component analysis: A cased study in the Xilin River Basin [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 95-103.]

[22] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005. [Zhang Renduo. Spatial Variation Theory and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2005.]

[23] 李亮, 史海滨, 贾锦凤, 等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 31-35. [Li Liang, Shi Haibin, Jia Jinfeng, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 31-35.]

[24] 张义强, 王瑞萍, 白巧燕. 内蒙古河套灌区土壤盐碱化发展变化及治理效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(增刊): 118-122. [Zhang Yiqiang, Wang Ruiping, Bai Qiaoyan. Development and change of soil salinization in Hetao irrigation area of Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(Suppl.): 118-122.]

[25] 李彬, 王志春. 松嫩平原苏打盐渍土碱化特征与影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(6): 183-191. [Li Bin, Wang Zhichun. The alkalization parameters and their influential factors of saline-

sodic soil in the Songnen plain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(6): 183-191.]

[26] 刘延锋, 靳孟贵, 金英春. 焉耆盆地土壤盐渍化状况的主成分分析[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1): 165-171. [Liu Yanfeng, Jin Menggui, Jin Yingchun. Principal component analysis of soil salinization in Yanqi Basin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(1): 165-171.]

[27] 王少丽, 许迪, 杨建国, 等. 宁夏银北灌区排水沟水的化学特征及其灌溉效应[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 166-172. [Wang Shaoli, Xu Di, Yang Jianguo, et al. Chemical characteristics and its irrigation effect of drainage water in ditches of Yinbei Irrigation Districts[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 166-172.]

[28] 寇薇. 内蒙古河套灌区土壤水盐空间变异性研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2008. [Kou Wei. Study on Spatial Variability of Soil Water and Salinity in Hetao District in Inner Mongolia, China[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2008.]

[29] 薛如君, 高天, 马二登, 等. 不同水肥一体化方式和施肥量对烤烟生长、氮磷钾利用及烟叶产质量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 22-30. [Xue Rujun, Gao Tian, Ma Erdeng, et al. Effects of fertigation method and fertilizer amount on the growth, N, P, K utilization, and yield of flue-cured tobacco[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 22-30.]

[30] 校康, 孙亚乔, 马卫国. 添加生物炭对降低冬小麦幼苗盐害并促进其生长的效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(11): 22-27. [Xiao Kang, Sun Yaqiao, Ma Weiguo, et, al. Effects of biochar for abating salt stress and promoting seeding growth of winter wheat in a saline soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38 (11): 22-27.]

Characteristics of salinization and fertility of saline-alkali soil adjacent to drainage ditch in Hetao irrigation area of Inner Mongolia

ZHOU Liying, LI Ruiping, MIAO Qingfeng, DOU Xu,
TIAN Feng, YU Dandan, SUN Chenyun

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,
Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: Reasonable improvement of saline-alkali soil in Hetao irrigation area adjacent to drainage ditch irrigation area can effectively promote ecological restoration and sustainable agricultural development. We analyzed saline-alkali soil's salinization and fertility characteristics adjacent to drainage ditch irrigation area in Urad Front Banner with descriptive statistical analysis and principal component analysis. The soil in the study area has heavy chloride saline, with Mg^{2+} being the key cation of soil salinization. The excessive content slows down the absorption rate and increase soil's alkalization rate. Soil's alkalinity in 0-40 cm depth ranged from 13.0%-28.6%. The alkalinity degree we observed was caused because calcium carbonate could not prevent the soil from absorbing sodium ions. On the other hand, Mg^{2+} in soil could not promote Na^{+} adsorption, and there was a function correlation between soil's pH, alkalinity, and total alkalinity. The principal component analysis results showed that the soil salinity, Cl^{-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, pH, total alkalinity, and alkalinity were the main factors of soil salinization. The soil in the study area was potassium-rich, whereas other fertility levels were low. The soil adjacent to the drainage ditch belongs to compound saline-alkali chloride soil and alkaline soil. Such soils are hard to cultivate because of particle dispersion, muddy, impermeable characteristics, and low fertility, requiring soil enrichment with fertility elements other than potassium. Our study contributes significantly for analyzing the saline-alkali soil in the Hetao irrigation area, allowing rational land use policy and ecological improvement measures to be taken and incentivizing regional sustainable development.

Keywords: drainage ditch; salinization; salt ion; alkalization degree; principal component analysis; fertility; Inner Mongolia